

## ФОРМУВАННЯ ПРОТИФІЛЬТРАЦІЙНОГО ЕКРАНА ВИБУХОМ СИСТЕМИ ЗАРЯДІВ У СТРУКТУРНО НЕСТІЙКИХ ГРУНТАХ

*В. Г. Кравець, докт. техн. наук, В. В. Ваннічна, інж., А. Б. Соколовська, канд. техн. наук, О. В. Шенітчак, студ. (НТУУ “КПІ”)*

*Изучены особенности развития деформационных процессов при взрыве системы линейных зарядов в массиве грунта с неустойчивыми структурными связями. Рассмотрены технологические аспекты использования пластических включений в качестве элементов противofильтрационного экрана.*

*Peculiarities of deformation processes development at explosion of linear charges system in ground massive with unstable structural bonds are studied. Technological aspects of use the plastic enclaves as elements of impervious screen are considered.*

Згідно з даними досліджень дії вибуху в грунтах з розвиненими структурними зв'язками, які не втрачаються в процесі деформування, область об'ємних деформацій у зоні впливу вибуху складається з двох зон [1].

У першій зоні (рис. 1) об'ємні деформації досягають максимуму, який визначається в першу чергу пористістю ґрунту і частковим випаровуванням та переміщенням порової вологи відносно мінерального скелету під впливом потужних стискуючих напружень і значних пластичних деформацій. Інтенсивність ущільнення ґрунту в цій зоні практично утримується на одному рівні, оскільки можливість її зростання стримується високою міцністю на всебічне стиснення мінеральної фази ґрунту. Однак слід відзначити, що загальна щільність масиву в цій зоні нижча від фізично можливої. Це пояснюється утворенням на стадії розширення газової порожнини системи радіальних тріщин у прилеглому до неї ґрунті, що зазнає дії високого тиску і температури.

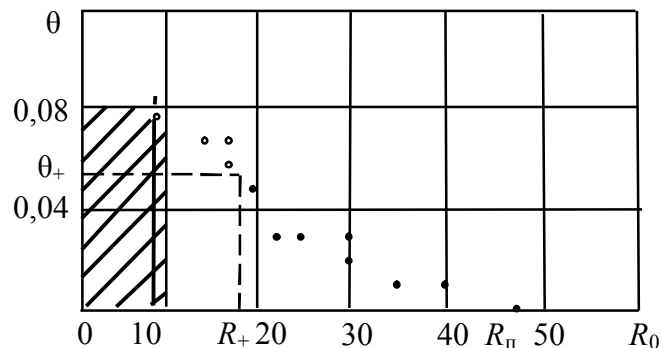


Рис. 1. Схема розподілення залишкових деформацій

За зоною максимального стиснення іде зона неповного деформування, в якій характер розподілу об'ємних деформацій підкоряється степеневому закону [1]

$$\Theta = KR^u. \quad (1)$$

Якщо вибух відбувається в пластичному глинистому ґрунті, в процесі його деформування під дією хвилі напружень та поршневої дії газів досягається значно вищий ступінь структурних зв'язків, які успішно протистоять силам розтягнення у зворотній (відбитій) хвилі під час розвантаження.

Складнішим є процес формування зони залишкових деформацій у водонасичених ґрунтах із більш нестійкими структурними зв'язками – суглинку, торфі, піску. При ущільненні вибухом структурно нестійких ґрунтів, особливо водонасичених, їх міцнісні параметри не зростають, а, навпаки, такі ґрунти часто повністю втрачають механічні властивості зв'язаного ґрунту і перетворюються на ґрунтову масу. Це обумовлює більш високу піддатливість деформованого вибухом ґрунтового масиву дії розтяжних напружень на стадії, коли розширення газової порожнини припиняється і ущільнений масив розвантажується. В деформованому вибухом масиві за межами області максимального ущільнення з'являється зона зниженої щільності. Очевидно, в цій зоні після її ущільнення відбувається руйнування набутих структурних зв'язків, при цьому можливі два механізми розущільнення. Якщо до вибуху ґрунт мав нестійку структуру, у зоні зниженої щільності відбувається осипання ґрунту, тобто має місце руйнування на рівні частинок ґрунту. Якщо ж ґрунт до вибуху мав достатньо стійкі структурні зв'язки, зниження щільності в цій зоні відбувається шляхом утворення тангенціальних тріщин відриву.

Вивчення динаміки розвитку поля напружень і деформацій в лесовому масиві [2] показало, що момент початку його зворотного руху в прилеглий до вибухової порожнини області збігається з моментом відриву хвилі напружень від поверхні порожнини. Саме тоді рівень деформацій прилеглого до порожнини масиву починає знижуватись, що свідчить про виникнення в цій зоні зворотних рухів ґрунту, тобто хвилі розвантаження.

Тоді ж, згідно з рис. 2, порожнина починає зменшуватися в діаметрі (перше схлопування). Отже, саме в момент відриву прямої хвилі напружень від порожнини зароджується зворотна (відбита) хвиля, яка викликає рух ущільнених шарів у бік порожнини з можливим утворенням колових відривних тріщин в області між зонами максимального і неповного ущільнення.

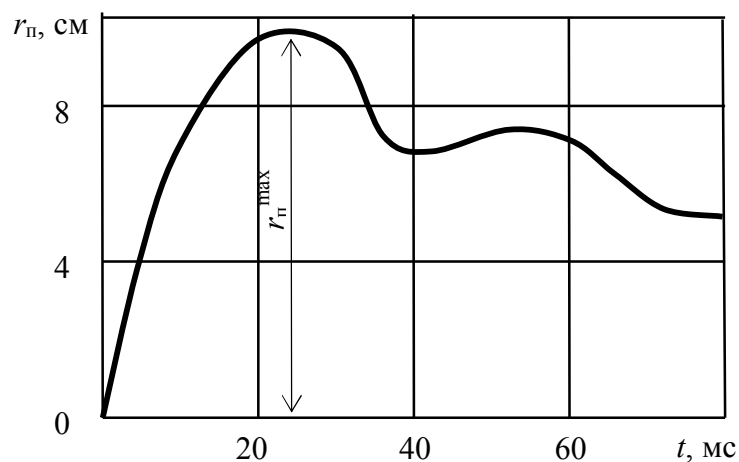


Рис. 2. Характер розвитку радіуса камуфлетної порожнини в часі

Якби ґрунт поведив себе подібно воді [3], то за зменшенням діаметра порожнини йшло б його нове зростання, коли повторно стиснуті гази знову починають розширюватись. Однак в ґрунті можливі лише два варіанти розвитку процесу.

Якщо деформований масив повітряно-сухий, а ґрунт має невідновлювані структурні зв'язки, то процес розвантаження масиву закінчується обрушенням прилеглої частини ущільненої зони в нижню частину порожнини. Це приводить до різкого збільшення діаметра порожнини і, відповідно, до завершення пульсаційного процесу. Подібний механізм динамічного деформування властивий також водонасиченим ґрунтам зі слабкими структурними зв'язками.

Якщо деформується зволожений лесовий ґрунт, то в процесі ущільнення він набуває нових структурних зв'язків і, відповідно, достатньої міцності. При подальшому схлопуванні порожнини такий ґрунт деформується без втрати міцності. Стінки порожнини мають достатню стійкість, а поза зоною максимального ущільнення формується зона колових тріщин відриву або зона зниженої щільності масиву. В цьому разі деформований масив зберігає свою міцність і протистоїть подальшій стадії пульсації газового пухиря, тобто порожнина повторно не розширюється. Однак внаслідок нового падіння тиску газів через їх поширення по тріщинах і остаточне охолодження вибухова порожнина може повторно частково стиснутись (див. рис. 2).

Принципово пульсаційний механізм деформування структурно нестійкого ґрунтового масиву такий же, як і в скельному породному масиві, описаному в [4], і також має місце в ґрунтах із стійкими структурними зв'язками, однак зовнішні наслідки пульсаційного процесу не виражені.

Експериментально для двох типів ґрунтів встановлено залежності діаметра порожнин  $d_n$  від лінійної маси заряду  $C_n$ . В діапазоні  $0 \leq \sqrt{C_n} \leq 1,4$  на зростаючій гілці залежності  $d_n(\sqrt{C_n})$ , де ще слабо впливає масштабний ефект, ці залежності для досліджуваних ґрунтів можуть бути апроксимовані прямими лініями.

Для легкого суглинку вологістю 7...15 %

$$d_n = 0,66 \sqrt{C_n}, \quad (2)$$

для піщаного ґрунту вологістю 5...12 %

$$d_n = 0,61 \sqrt{C_n}. \quad (3)$$

При подальшому вивченні механізму формування порожнини в камуфлетному режимі доцільно звернути увагу на наведені вище залежності і врахувати особливості механізму формування порожнини і залишкову картину розподілу деформацій ґрунту при дії не лише поодинокого, а й двох суміжних зарядів. Це потрібно, наприклад, при створенні вибухом системи зарядів суцільної монощілини.

Якщо вибух виконується в ґрунті, який зберігає надані йому вибухом високі міцнісні характеристики, ущільнена зона може бути достатньою для формування екрану без будь-якої додаткової обробки.

При збільшенні проміжку між зарядами поле деформацій поширюється не лише на зону поза межами площини зарядів, а й на масив між суміжними зарядами. Техніка спорудження екрану в цьому випадку потребує більшої уваги до структури деформованої зони, оскільки взаємодія зустрічних ударних хвиль у площині двох суміжних зарядів при певній відстані між ними призведе до формування зони розуцільнення між зарядами.

Принцип побудови прилеглого до системи зарядів протифільтраційного шару не передбачає строгої рівномірності його розташування в плані; головна вимога до цього шару – неперервність екрана. За наявності розривів поля деформацій різного типу – поздовжніх і поперечних відносно площини зарядів, а також при відстанях між суміжними зарядами в ряду, що перевищують оптимальні, можна припустити появу ослаблених ділянок екрана, які потребуватимуть особливої уваги. Навіть якщо заповнити кожен порожнину в системі протифільтраційним матеріалом, можливі розриви в системі екрана через розуцільнення між зарядами, утворені пульсуючими рухами масиву і порожнини.

Дослідження зазначених явищ виконане в структурно нестійких ґрунтах двох типів – піску і легкому суглинку. Техніка експериментів полягала у встановленні дерев'яних марок у вигляді кубиків із стороною 1 см за квадратною сіткою  $5 \times 5$  см у ґрунті (відповідно площа чарунки в мережі марок становила  $s_0 = 25 \text{ см}^2$ ) на рівні середини осей зарядів. Попередньо встановлені заряди та марки засипались пошарово досліджуваним ґрунтом, який злегка утрамбовувався. Мережа марок після вибуху суміжних зарядів розкопувалась і вимірювались величини їх переміщень. Далі за допомогою міліметрової сітки обчислювалась площа кожної чарунки після деформування  $s_1$ , яка перераховувалась на деформації через залежність  $\Theta = 1 - s_1/s_0$ .

Згідно з цими обчисленнями було отримано дані про конфігурацію зони залишкових деформацій складної структури (рис. 3). Ця зона відображає кінцевий момент затухання пульсаційних процесів у системі порожнин з формуванням ядра розуцільнення в центральній зоні між зарядами внаслідок накладання двох фронтів і, відповідно, з утворенням між зарядами вздовж осі симетрії  $O_1-O_2$  зони різкого зниження щільності ґрунту та значним розширенням (практично вдвічі) ущільненої зони вбік по нормалі до площини зарядів (напрямок  $A_1-A_2$  на рис. 3). Різниця значень об'ємної деформації особливо помітна в межах ізоліній  $\Theta = 0,2 \dots 0,1$ .

Радіуси вибухових порожнин також фіксувались за положенням чотирьох марок на кожний заряд, встановлених на межі з зарядом по квадрантах. Звертає на себе увагу той факт, що при взаємодії паралельних зарядів форма поперечного перерізу порожнин набуває еліптичної форми. Це пов'язано з посиленням взаємного впливу порожнин, що, в свою чергу, виражається в пульсації їх стінок і в підсиленні ефекту взаємодії переважно по лінії зарядів.

Згідно з отриманою формою поля залишкових деформацій, що оточує суміжні заряди, між ними формується область розуцільнення, яка порушує неперервність протифільтраційного екрана. Форма цієї області свідчить про домінуючу роль в її утворенні взаємодії зустрічних хвиль напружень і подальших пульсаційних процесів.

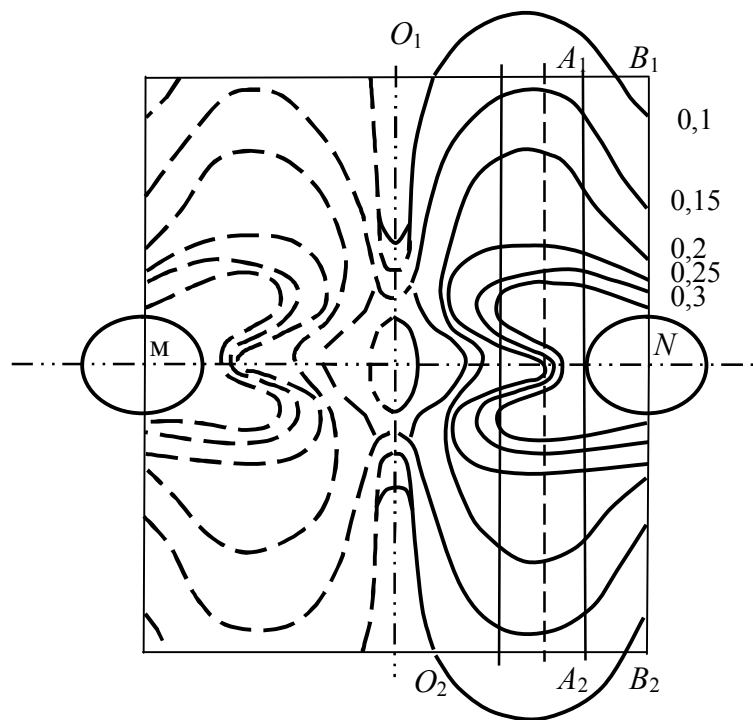


Рис. 3. Поле деформацій при вибуху спарених лінійних зарядів

Запобігти утворенню такої області можна шляхом:

зближення зарядів у системі таким чином, щоб високий рівень напружень і відповідних деформацій масиву на лінії зарядів виключав можливість її утворення;

попереднього розташування між зарядними виробками в місці очікуваного утворення зони зниженої щільності допоміжної незарядженої свердловини збільшеного діаметра; свердловина заповнюється структуруючим неущільнюваним розчином, який залишається в ній, повторюючи її форму і забезпечуючи непроникність майбутнього екрана.

Порівнюючи перспективність обох методів, бачимо, що перший метод передбачає зближення зарядів з відповідним зростанням питомих витрат за статтями “буріння” і “підривання”. Якщо ж збільшувати відстань між зарядами, витрати за статтею “підривання” зменшаться, а за статтею “буріння” – зростуть. При збільшенні вдвічі відстані між зарядними свердловинами і розташуванні допоміжної свердловини між ними об’єм буріння практично не зміниться, а витрати на вибухові матеріали скоротяться вдвічі. Останнє є вагомим аргументом на користь другого методу, навіть за умови додаткових витрат на кольматант.

Для виявлення особливостей деформування пластичного елемента в площині зарядів і оптимальних параметрів взаємного розташування суміжних зарядів з урахуванням деформаційних явищ, що визначають форму спільного поля деформацій в області очікуваного розущільнення між двома зарядами та його конфігурацію, виконано експерименти в сухому піску. Досліджувалась форма поперечного перерізу пластичного елемента в площині, нормальній до осі зарядів на рівні їх середини.

На рис. 4 наведено схему розташування суміжних зарядів і пластичного включення з діаметром  $d$ . Штриховою лінією позначено можливий характер деформування включення в поперечному перерізі після вибуху зарядів. На рис. 5 наведено залежність  $\varepsilon$  у відносних одиницях відношення більшої  $r_1$  і меншої  $r_2$  напівосей еліпса  $\varepsilon = \frac{r_1}{r_2}$  від величини приведенної відстані між зарядами  $a_0 = a/d$ .

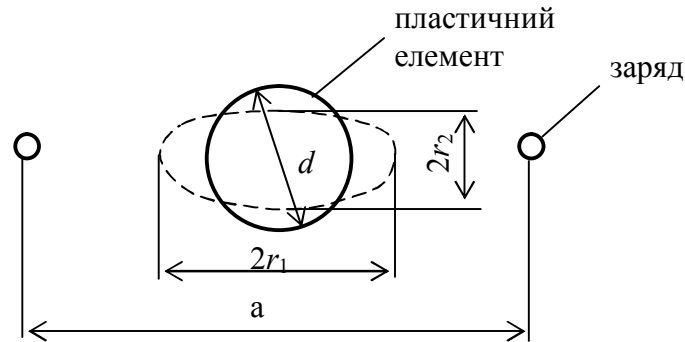


Рис. 4. Схема розташування елементів комбінованої системи

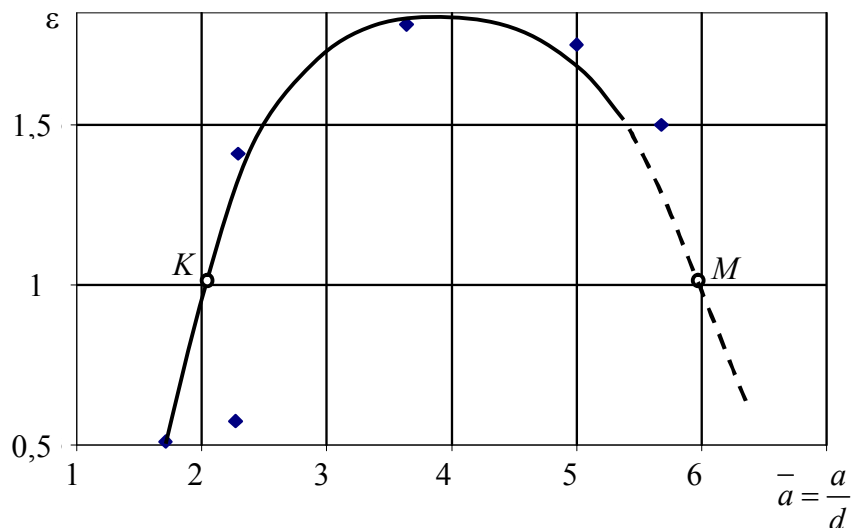


Рис. 5. Залежність між основними параметрами комбінованої схеми спорудження екрана

Аналіз наведеної залежності свідчить про те, що круглий поперечний переріз пластичного елемента після вибуху під впливом деформаційних процесів на лінії зарядів перетворюється в більшості випадків на еліптичний. В залежності від відстані між зарядами велика вісь еліпса може розташовуватись або по лінії зарядів (відношення  $\varepsilon > 1$ ), або по нормалі до неї (відношення  $\varepsilon < 1$ ), тобто може змінювати орієнтацію в плані на  $90^\circ$ . Пояснити це можна зміною інтенсивності динамічної взаємодії двох зустрічних деформаційних процесів, яка супроводжується більш або менш інтенсивною пульсацією в проміжку між зарядами.

Точки  $K$  і  $M$  на перетині наведеної кривої  $\varepsilon = f(\varepsilon)$  з ординатою  $\varepsilon = 1$  свідчать, що в них  $r_1 = r_2$ , тобто переріз пластичного елемента залишився круглим і амплітуда стиснення ядра рівноцінна за величиною амплітуді

пружної віддачі. При малій відстані між зарядами і достатньо великій потужності зустрічних хвиль напружень інтенсивний пульсаційний процес нівелює стиснення ядра. Із зростанням відстані між зарядами  $a$  після зустрічі двох фронтів і стиснення пластичного елемента з подальшим утворенням потужних відбитих хвиль на елемент діють розтяжні сили, що викликають деформацію розтягнення, яка в діапазоні  $a_0 = 2,1 \dots 6,5$  перевищує деформацію стиснення пластичного елемента.

Отримані закономірності розвитку процесу формування ядра з пластичного включення можуть бути використані при доборі оптимальних параметрів розташування комбінованої системи зарядів з додатковими пластичними включеннями. Як приклад, наведемо гіпотетичний варіант розрахунку такої системи. Прийнемо відстань між суміжними зарядами масою 1,0 кг/м в системі  $a = 1,0$  м. Згідно з рис. 5 оптимальна відносна відстань між зарядами, при якій буде досягнутий максимум деформації круглого перерізу пластичного включення, становитиме  $a_0 = 5,0$ . Тоді діаметр пластичного включення  $d = 1000 \text{ мм}/5 = 200 \text{ мм}$ . Такий же діаметр доцільно прийняти для зарядних свердловин за умови, що вони після розміщення зарядів діаметром близько 30 мм будуть заповнені структуруючим розчином, призначеним для тимчасового утримання стінок вибухової порожнини від обрушення. В цьому випадку після вибуху суміжних зарядів співвідношення між півосями еліпса складе  $\varepsilon \approx 1,8$ , довжина осі еліптичного поперечного перерізу пластичного елемента становитиме  $2r_1 = 560 \text{ мм}$ , довжина осі  $2r_2$  – близько 320 мм.

### Висновки

При утворенні водозахисного екрана шляхом ущільнення масиву структурно нестійкого ґрунту вибухом окремих зарядів і їх систем спостерігаються негативні явища, пов'язані з пульсаційними процесами у вибуховій порожнині та деформівному масиві. Ці явища можуть бути враховані і використані при плануванні технологічної схеми спорудження екрана шляхом розміщення в прогнозованому місці виникнення зони розущільнення включення пластичного водостійкого матеріалу, яке під час вибуху системи зарядів деформується, перетворюючись на елемент протифільтраційної споруди. Отримані співвідношення в системі зарядів і пластичних включень дозволяють вибирати оптимальні параметри їх взаємного розташування. Подальші дослідження мають бути спрямовані на розширення діапазону ґрунтових умов, а також впливу масштабного фактору.

1. *Кравець В. Г.* Динамика уплотнения ґрунтового массива взрывом. – К.: Наук. думка, 1979. – 134 с.
2. *Геодинамика взрыва и ее приложение / А. А. Вовк, В. Г. Кравец, И. А. Лучко, А. В. Михалюк.* – К.: Наук. думка, 1981. – 296 с.
3. *Коул Р.* Подводные взрывы. – М.: Изд-во иностр. лит., 1950. – 425 с.
4. *Сизов И. А., Спивак А. А., Цветков В. М.* О поведении среды в зоне разрушения при камуфлетном взрыве // Взрывн. дело. – 1976. – № 76/33. – С. 58–66.